

# 초기변형 허용값을 고려한 직접해석법 적용

김희동<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> 조교수, 인하공업전문대학 건축과

## Application of Direct Analysis Method Considering Initial Imperfection Limitation

Kim, Hee Dong<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> Assistant Professor, Department of Architecture, Inha Technical College, Incheon, 402-752, Korea

**ABSTRACT** : As the first step to suggest effective ways of using direct analysis method considering current situations of construction fields in Korea, analytical approach is used to verify direct analysis method which adapts initial imperfection limitation of Korean specification of building construction. The main analytical variables are size of frames, axial load ratio, axial load distribution, value of notional loads, location of notional loads, and applied method of notional loads. The results show that the use of initial imperfection limitation of Korean specification,  $L/700$  is suitable, and the recommendable method to use direct analysis method is applied notional loads based on  $L/700$  as minimum lateral load at each story, even if B2 is less than 1.5 and lateral loads exist.

**KEYWORDS** : initial imperfection limitation, direct analysis method, symmetric unbraced frames, notional load, minimum lateral load

### 1. 서론

건축구조기준(이하 KBC2009, 2009)<sup>[1]</sup>에서는 강구조의 안정설계를 위한 방법 중 하나로 직접해석법(direct analysis method)을 제안하고 있다. 직접해석법에서는 피할 수 없는 구조물의 초기변형(initial imperfection) 및 잔류응력과 구조 재료의 비탄성 거동 등을 소요강도 산정시 고려할 수 있도록 가상하중 및 부재 강성 감소를 해석에 도입하고 있으며 설계강도 산정시 유효좌굴길이계수(K)를 1.0으로 적용할 수 있어 이를 안정설계에 도입할 경우 효율적이고 신뢰성 높은 설계 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다<sup>[2],[3],[4]</sup>.

이러한 연유로 AISC360-10<sup>[5]</sup>에서는 강구조물의 안정설

계를 위해 기존에 제안되었던 유효길이법(effective length method) 및 1차 해석법(first-order analysis method)을 대신하여 직접해석법을 안정설계의 기본 방안으로 제시하고 있다.

하지만 국내의 경우, 실무 적용 관련 정보 부족으로 강구조물의 안정설계에 직접해석법이 적극적으로 사용되지 못하고 있는 실정이다. 이를 위해 저자는 선행 연구를 통하여 직접해석법의 실무 적용을 위한 기초 연구를 수행하여 직접해석법의 효율적 적용 방안을 제안한 바 있다<sup>[2]</sup>.

하지만, 직접해석법의 실무 적용을 위해서는 적용된 가정 및 조건들이 국내 현실을 적절히 반영해야 하며, 적용 타당성과 관련한 명확한 지침이 제시되어야 한다. 이러한 관점에서 볼 때 구조물에서 피할 수 없는 초기변형이 골조의 안정성에 미치는 영향을 고려하기 위해 제안된 가상하중(notional load:  $0.002Y_i$ )의 경우 실제 국내 강구조물의 제작 및 설치시 적용되는 초기변형 허용값이 적용되어야 하지만 현재 기준에서 제안하고 있는 식은 AISC360-10의 기준을 준용하고 있다.

이에 본 연구에서는 국내 강구조물의 제작 및 설치 현실을 반영한 가상하중의 제안을 위한 초기연구로 중저층 대칭형 2

Note.-Discussion open until April 30, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 7, 2013; revised June 25, 2013; approved on July 30, 2013. © KSSC 2013

\* Corresponding author

Tel. +82-32-870-2251 Fax. +82-32-870-2512  
E-mail: drkimhd@inhatc.ac.kr

차원 비가새 골조를 대상으로 국내 실정을 반영한 초기변형 허용값 적용의 타당성 및 최적 활용방안을 해석적으로 검증하여, 추후 국내 현실을 반영한 직접해석법 기준 개정을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 초기변형 허용값에 따른 가상하중

KBC2009<sup>(1)</sup>에서는 초기변형에 따른 영향을 고려하기 위한 방법 중 하나로 초기변형 허용값에 근거한 식 (1)과 같은 가상하중을 제안하고 있다.

$$N_i = 0.002 \cdot Y_i \quad (1)$$

여기서,  $Y_i$  :  $i$  층에 작용하는 설계중력하중의 합 (N)

식 (1)의 가상하중은 구조물의 최대 초기변형을 L/500으로 가정하여 제안된 것이다<sup>(5)</sup>. 따라서 초기변형의 허용값이 적용된 L/500과 다를 경우 초기변형의 영향을 적절하게 평가하지 못할 가능성이 있다. 이에 건축구조기준에서는 초기변형 제한값이 L/500과 다를 경우 이의 비례에 따라 적절히 가상하중을 조정할 수 있도록 허용하고는 있으나 국내 구조 실무 현실을 고려하면 비례에 따른 수치 조정 및 조정된 수치의 타당성 평가를 설계 업무 중에 수행하기에는 한계가 있는 것이 현실이다. 따라서 직접해석법의 실무 적용을 위해서는 초기변형 제한값이 L/500과 다를 경우 개선된 가상하중식을 명확히 제안 해주어야 할 필요가 있다.

현재 국내 강구조물의 제작 및 설치시 준용되는 건축공사표준시방서(2006)<sup>(6)</sup>의 철골공사편에서는 기둥의 기울기에 따른 초기변형과 관련된 허용값을 Table 1과 같이 제안하고 있으며, 강구조물 공사 면허를 득한 국내 강구조물 제작, 설치 업체에서는 Table 1의 제안값에 따라 강구조물을 시공하고 있다. 따라서 규정에 맞게 관리가 되고 있는 정상적인 현장일 경우 L/700이 국내 강구조 제작 및 설치시 기둥에서 발생 가능한 최대 초기변형이라 가정할 수 있으며, 이는 AISC 360의 허용 초기변형량을 반영한 KBC2009의 제안값인 L/500에 약 71.4%에 해당하는 수치이다.

이를 기반으로 기준에서 언급된 바와 같이 비례에 따라 가상하중식을 조정하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

Table 1. Initial imperfection limitations

Guide line	Allowable limitation
$e \leq \frac{L}{1,000}$ or $e \leq 10\text{mm}$	$e \leq \frac{L}{700}$ or $e \leq 15\text{mm}$

$$N_i = 0.00143 \cdot Y_i \quad (2)$$

따라서, 기준에 명시된 L/500을 기반으로 한 가상하중을 계속 사용할 경우, 실제 건물에서 발생 가능한 최대 초기변형 값을 과대평가하게 되므로 이는 결국 소요강도의 과대평가로 인한 소요 강재량의 증가와 같이 강구조 경쟁력 저하를 유발할 수 있는 결과를 가져올 수 있다.

이에 건축공사표준시방서에서 제안하고 있는 기둥재 초기변형의 한계허용값인 L/700을 적용한 가상하중(식 (2))의 사용 타당성 및 최적 활용방안을 다음과 같이 평가하였다.

## 3. 직접해석법을 적용한 안정해석

### 3.1 해석 조건

본 연구에서는 3층 1스팬(3F1S) 및 5층 3스팬(5F3S) 중저층 강구조 비가새 골조를 해석대상 골조로 수치해석을 수행하였다. 스패는 X 방향으로 9,000mm, Y 방향으로 8,000mm를 적용하였고, 층고는 1층의 경우 5,000mm를 적용하고 이외 층의 층고는 4,000mm를 적용하였다. 적용된 골조의 기둥-보 접합부는 모두 강접으로 가정하였으며, 지점 조건은 고정단으로 하였다(Fig. 1 참조).

해석 대상 방향인 X 방향의 횡력저항 시스템으로는 비가새 골조(모멘트 골조)를 적용하였으며, Y 방향의 경우 가새 골조를 적용한 것으로 가정하였다.

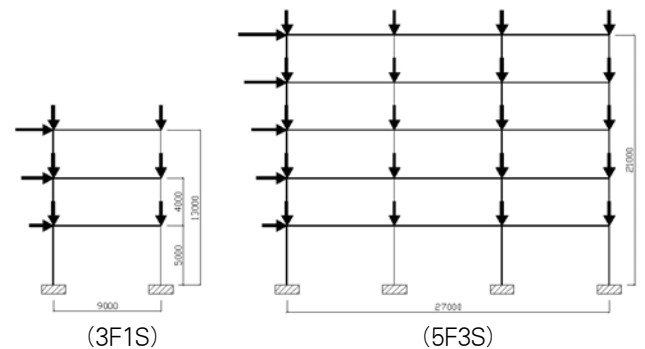


Fig. 1 Analysis frames (X-Z section)

Table 2. Sections of analysis frames

	3F1S	5F3S
Girder	H-506×201×11×19 (SHN400)	H-506×201×11×19 (SHN400)
Column	H-304×301×11×17 (SHN490)	H-350×357×19×19 (SHN490) H-250×255×14×14 (SHN490)

부재설계는 서울 소재 일반 사무소 건물을 기준으로 KBC 2009 하중 조건에 근거하여 수행하였다. 적용된 부재 단면과 강종은 Table 2와 같다. 해석 대상 골조에 적용되는 하중은 모두 기둥-보 접합부에 작용하는 절점하중(nodal load)으로 고려하였다.

해석골조 중 구체적 고찰 대상은 기하학적 비선형의 영향이 가장 크게 나타나는 1층 기둥재로 선정하였다<sup>[2]</sup>.

## 3.2 주요 변수

초기변형 허용값에 따른 변화를 고찰하기 위해 비가새 골조의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 골조의 규모, 축력비, 축력 분포, 가상하중 크기, 가상하중 적용 위치, 최소수평하중 개념 적용 여부 등을 주요 해석 변수로 선정하였다. 주요 변수에 대해 간단히 요약하면 다음과 같다.

### 3.2.1 골조의 규모

골조의 규모는 3.1절에서 언급한 바와 같이 3층 1스팬(표기:3) 및 5층 3스팬(표기:5) 중저층 비가새 골조를 대상으로 하였다. 일반적으로 기하학적 비선형의 영향에 심각성은 고층 건축물에서 증가하나 비가새 골조 시스템이 주로 적용되는 골조 형식을 고려할 때 중저층 구조물이 현실적이라 판단하였으며 중저층 건축물이라 하더라도 경우에 따라서 기하학적 비선형 거동이 구조물의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있으므로<sup>[7]</sup> 중저층 비가새 골조를 연구 대상 골조로 선정하였다.

또한, 구조물의 변장비 변화에 따른 영향도 함께 고찰하기 위해 5층 3스팬 골조와 3층 1스팬 골조는 골조의 변장비(aspect ratio)가 각 0.78, 1.44가 되어 약 2배 차이가 나도록 층고와 스패를 결정 하였다.

### 3.2.2 축력비

본 연구에서 적용된 축력비는 동일 기둥열에 작용하는 모든 축방향 절점하중의 단순합에 의한 최하층 기둥재의 축력비를 의미하며, 휨모멘트에 의해 부재 항복이 지배되도록 축력비를 0.3으로 유도한 저축력(표기:L) 경우와 축력에 의해 부재 항복이 지배되도록 유도한 축력비 0.6의 고축력(표기:H) 경우를 변수로 선정하였다. 이를 통하여 기둥재의 한계상태를 결정하는 하중 종류에 따른 영향을 고찰할 수 있도록 하였다.

### 3.2.3 축력 분포

골조의 안정성에 큰 영향을 미치는 요인 중 하나가 축력이

며 이러한 축력의 분포는 축력비 뿐 아니라 3.2.5에서 언급될 가상하중 적용 위치에 따라서는 수평하중 패턴에도 변화를 줄 가능성이 있다.

따라서 기둥재에 작용하는 축력이 균등한 바닥하중에 의해 결정되어 내부 기둥재의 축력이 외각부 기둥재보다 큰 경우(표기:E)와 바닥 하중의 차이에 의해 외각부 기둥의 축력이 더 큰 경우(표기:U)를 변수로 선정하여 축력분포에 따른 영향을 고찰할 수 있도록 하였다.

### 3.2.4 가상하중 크기

2장에서 언급한 바와 같이 초기변형 허용값에 따라 가상하중값은 식 (1)과 식 (2)와 같이 달라질 수 있다. 따라서 이들의 영향을 고려하기 위해 본 연구에서는 기준에서 허용하는 바와 같이 B2계수가 1.5 이하이며 수평하중이 존재하는 경우 가상하중을 생략하고 추가 강성감소( $\tau_b$  대신)를 위한  $0.001Y_i$  만 추가한 경우(표기:1)와 B2계수 크기에 관계없이 초기변형 허용값에 따라  $0.002Y_i$ 를 추가강성감소를 위한 가상하중에 추가한 경우(표기:5)와  $0.00143Y_i$ 를 추가한 경우(표기:7)를 변수로 선정하여 가상하중 크기 변화에 따른 영향을 고찰하였다.

### 3.2.5 가상하중 적용 위치

KBC2009에서는 가상하중은 층별로 적용하는 것으로 언급되어 있으나 명확한 해석상 적용 지점에 대한 언급은 없다. 따라서 본 연구에서는 각 층별 축력을 고려하여 산정된 가상하중을 각 층의 외측 기둥 상부 절점에 층수평하중과 같은 형태로 적용한 경우(표기:S)와 각 기둥재별 축력을 고려하여 산정된 가상하중을 각 기둥재 상부 절점에 작용한 경우(표기:C)를 변수로 하여 가상하중의 적용 위치에 따른 영향을 고찰하였다.

### 3.2.6 최소수평하중 개념 적용 여부

KBC2009에서는 "1차횡변위에 대한 2차횡변위의 비율이 1.5 이하인 골조인 경우 다른 횡하중의 조합을 배제한 중력하중 만의 조합에 대한 최소횡하중을 가상하중  $N_i$ 에 적용할 수 있다."라고 명시되어 있다. 이에 본 연구에서는 B2계수 크기에 따라 수평하중이 존재하는 하중조건 하에서 가상하중이 배제된 경우(표기:N)와 기존의 수평하중과 가상하중 중 큰 값이 최소수평하중 개념으로 적용된 경우(표기:5 또는 7)를 대상으로 그 결과를 고찰하여 기준에서 허용하고 있는 가상하중 적용 개념에 따른 변화를 고찰하였다. 단, 두 경우 모두 부재 소성화에 따른 추가 강성감소를 고려하기 위해  $0.001Y_i$ 는 추가되었다.

Table 3. Names of variables

3	H	E	1	C	5	
						Minimum lateral load concept (5 : considering 0.002Y <sub>i</sub> , 7 : considering 0.00143Y <sub>i</sub> , N : non-consider A : simply added)
						Notional load applied points (C : each column, S : each story)
						Notional load values (1 : 0.001Y <sub>i</sub> , 5 : (0.001+0.002)Y <sub>i</sub> 7 : (0.001+0.00143)Y <sub>i</sub> IN : second order inelastic analysis)
						Axial load distribution (E : even, U : uneven)
						Axial load ratio (L : 0.3, H : 0.6)
						Story of frame (3 : 3story, 5 : 5story)

상기에 언급된 각 변수의 표기 방법은 Table 3에 나타내었다.

### 3.3 직접해석법을 적용한 인정해석

상기에 제안된 조건하에서 직접해석법을 각각의 변수에 대해 시행하였다. 직접해석법 적용시 2차 효과(P-Δ, P-δ 효과)를 고려하기 위해 1차 선형탄성해석 결과와 하중증폭계수(B1, B2 계수)를 적용하였으며, 수행된 직접해석법의 타당성

을 평가하기 위해 동일한 구조적 조건 하에서 2차 비탄성 해석(표기:IN)을 수행하였다. 이상의 해석 수행을 위해 Ziemian 및 McGuire에 의해 개발된 선형탄성 및 비선형 비탄성 골조 해석 프로그램인 MASTAN2 ver.3.3<sup>[8]</sup>을 활용하였다.

직접해석법의 적용을 위한 선형탄성해석시에는 기준의 내용에 따라 전 부재의 강성을 0.8배 감소하여 (0.8E 적용) 해석을 수행하였으며, 반복 해석이 요구되는 부재 축력에 따른 추가 강성감소계수인 τ<sub>b</sub>를 적용하지 않기 위해 가상하중인 0.001 Y<sub>i</sub>를 수평하중에 누가<sup>[7]</sup>하여 해석을 수행하였다.

2차 비탄성해석시에는 초기 변형의 영향을 고려하기 위해 구조 해석 모델링시 층별로 각 변수별 초기변형 허용값을 절점 변위의 형태로 해석 모델링에 직접 반영하였다. 적용된 초기변형 값은 동일 변수 계열의 직접해석법에서 적용된 가상하중값 산정 근거와 동일한 값이다.

또한, P-δ효과에 의한 영향을 해석적으로 평가하기 위해 기둥부재를 2개의 요소로 분할하여 모델링하였으며, 직접해석법의 적용시에는 B1 계수를 적용하였다.

이상과 같은 해석을 통해 파악된 각 변수별 1층 기둥재의 축력 및 최대 휨모멘트를 Table 4 및 Table 5에 나타내었다. 단, 해석 적용 결과 모든 경우에서 B2는 1.5 이하로 나타났으며, B1 계수도 1.0 값이 적용되었다.

해석 결과에서 최소수평하중 개념 관련 변수의 경우 축력값이 작아 초기변형 허용값에 근거한 가상하중값이 기존의 수평하중값보다 작을 경우 최소수평하중 적용의 경우 결과가 가상하중을 배제한 결과와 동일하게 되므로 축력값에 따라 적용 변수에 차이가 발생하였다.

Table 4. Results of analysis (3F1S cases)

Variables	Axial load (kN)		Moment (N.m)		Variables	Axial load (kN)		Moment (N.m)	
	C1	C2	C1	C2		C1	C2	C1	C2
3HE1CN	2,614	2,644	29,970	29,939	3LE1CN	1,181	1,447	257,411	257,021
3HE1C5	2,613	2,644	32,610	32,541	3LE1SN	1,181	1,447	257,423	257,010
3HE1C7	2,613	2,644	30,866	30,822	3LE5CA	1,177	1,452	266,154	265,753
3HE1SN	2,614	2,644	29,987	29,920	3LE5SA	1,177	1,452	266,178	265,730
3HE1S5	2,613	2,644	32,629	32,522	3LE7CA	1,178	1,450	263,663	263,261
3HE1S7	2,613	2,644	30,885	30,805	3LE7SA	1,178	1,450	263,674	263,238
3HE5CA	2,604	2,653	50,348	50,318	3LE5IN	1,187	1,440	248,220	247,310
3HE5SA	2,604	2,653	50,404	50,263	3LE7IN	1,197	1,431	226,050	225,710
3HE7CA	2,607	2,650	44,540	44,509					
3HE7SA	2,607	2,650	44,584	44,465					
3HE5IN	2,611	2,646	35,687	35,637					
3HE7IN	2,614	2,643	30,493	30,452					

Table 5. Results of analysis (5F3S cases)

Variables	Axial load (kN)				Moment (N.m)				Variables	Axial load (kN)				Moment (N.m)			
	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4		C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
5HE1CN	1,858	3,712	3,702	1,925	50,873	58,099	62,617	56,082	5HU1CN	3,673	1,897	1,886	3,741	56,465	62,746	57,945	50,517
5HE1C5	1,858	3,712	3,702	1,925	51,108	58,333	62,842	56,286	5HU1C5	3,673	1,897	1,886	3,741	56,701	62,982	58,169	50,720
5HE1SN	1,858	3,712	3,702	1,925	51,010	58,113	62,553	55,999	5HU1SN	3,673	1,897	1,886	3,741	56,589	62,773	57,893	50,420
5HE1S5	1,858	3,712	3,702	1,925	51,246	58,349	62,778	56,201	5HU1S5	3,673	1,897	1,886	3,741	56,825	63,009	58,118	50,623
5HE5CA	1,847	3,714	3,700	1,935	70,040	79,679	84,197	75,248	5HU5CA	3,663	1,898	1,885	3,751	75,658	84,302	79,502	69,711
5HE5SA	1,847	3,714	3,700	1,935	70,450	79,726	84,005	74,997	5HU5SA	3,663	1,898	1,885	3,751	76,029	84,385	79,345	69,419
5HE7CA	1,850	3,713	3,701	1,932	64,577	73,528	78,047	69,787	5HU7CA	3,666	1,898	1,885	3,748	70,188	78,158	73,358	64,241
5HE7SA	1,850	3,713	3,701	1,932	64,910	73,566	77,890	69,583	5HU7SA	3,666	1,898	1,885	3,748	70,489	78,226	73,231	64,004
5HE5IN	1,855	3,713	3,702	1,927	56,323	63,814	68,435	61,510	5HU5IN	3,671	1,897	1,886	3,743	61,176	69,123	64,354	55,221
5HE7IN	1,858	3,712	3,702	1,925	51,178	58,093	62,711	56,369	5HU7IN	3,674	1,897	1,886	3,740	56,123	63,311	58,542	50,176
5LE1CN	685	1,894	1,814	1,205	403,648	454,936	455,968	403,041	5LU1CN	1,592	986	906	2,113	406,401	457,244	453,648	400,298
5LE1SN	685	1,894	1,814	1,206	403,714	454,948	455,936	402,998	5LU1SN	1,592	986	906	2,113	406,456	457,256	453,627	400,255
5LE5CA	680	1,895	1,813	1,210	412,386	464,785	465,806	411,780	5LU5CA	1,588	987	906	2,118	415,151	467,072	463,487	409,048
5LE5SA	680	1,895	1,813	1,210	412,572	464,796	465,719	411,660	5LU5SA	1,588	987	906	2,118	415,325	467,104	463,410	408,917
5LE7CA	681	1,895	1,814	1,209	409,893	461,976	462,997	409,286	5LU7CA	1,589	987	906	2,117	412,658	464,274	460,678	406,555
5LE7SA	681	1,895	1,814	1,209	410,047	461,988	462,933	409,190	5LU7SA	1,589	987	906	2,117	412,802	464,297	460,625	406,447
5LE5IN	683	1,893	1,813	1,205	408,520	458,240	459,520	406,510	5LU5IN	1,598	984	906	2,106	395,910	448,350	445,080	388,760
5LE7IN	685	1,893	1,813	1,203	406,090	455,540	456,810	404,090	5LU7IN	1,600	984	906	2,105	393,510	445,620	442,340	386,370

#### 4. 해석결과 고찰

##### 4.1 초기변형 허용값 변화에 따른 소요강도

2장에서 언급한 바와 같이 직접해석법의 가상하중 산정을 위해 현재 KBC2009에서 제안하고 있는 식 (1)의 기반인 초기변형 허용값  $L/500$ 과 건축공사표준시방서에서 허용하고 있는 초기변형 허용값  $L/700$ 을 적용한 소요강도를 비교하기 위해 각 초기변형 허용값별 2차 비탄성해석 결과의 비( $(L/700)/(L/500)$ )를 Fig. 2과 Fig. 3에 나타내었다.

비교 결과 축력의 경우 초기변형 허용값의 차이에 따른 결과의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다(Table 4, 5 및 Fig. 2 참조). 하지만 휨모멘트의 경우에는 변수에 따라서 그 차이가 축력에 비해 크게 발생하고 있다(Fig. 2 및 3 참조). 이러한 차이는 골조의 규모가 작고 변장비가 클수록 (3F1S), 그리고 축력비가 높을 수록 (H) 커지는 것으로 나타났다.

따라서, 골조의 규모가 중, 소규모이면서 변장비가 크고 축력비가 높은 구조물일 수록 초기변형 허용값 변화에 민감하게 반응 하는 것으로 나타났으며, 본 연구의 결과에서는 초기변형 허용값을  $L/500$ 에서  $L/700$ 으로 조정할 경우 두 해석 결과의 비교에서 최대 25%의 기동재 모멘트 감소가 나타났다.

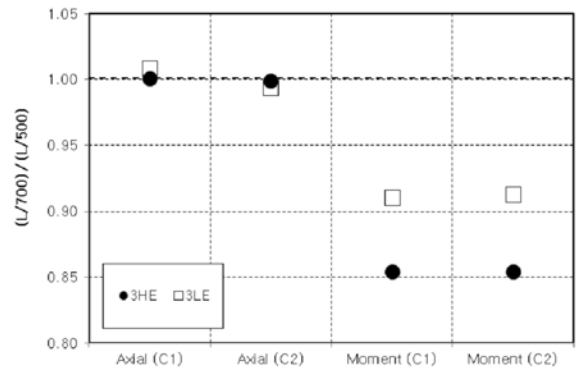


Fig. 2 Ratio of L/700 and L/500 (3F1S)

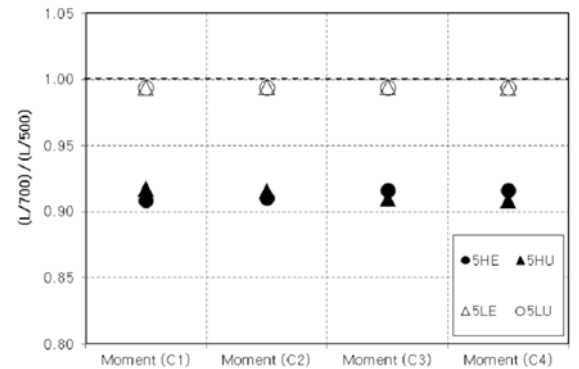


Fig. 3 Ratio of L/700 and L/500 (5F3S)

그러므로 국내 현실을 감안한 초기변형 허용값을 직접해석법에 반영하는 것은 최근의 건설업계 현실을 감안할 때 강구조 경쟁력 확보를 위해서 필히 고려되어야 할 것으로 판단된다.

## 4.2 각 변수별 영향 고찰

### 4.2.1 골조의 규모

골조의 규모 변화에 따른 영향을 평가하기 위해 층수별 1층 기둥재의 각 변수별 직접해석법 적용 결과(DAM)와 2차 비탄성해석 결과(IN)에 휨모멘트 비의 평균값을 Fig. 4에 나타내었다.

축력의 경우 골조 규모에 따른 소요강도 변화가 거의 없는 것으로 나타났다(Table 4, Table 5 참조). 그러나 휨모멘트의 경우 가상하중을 단순 누가 한 경우(5\_A, 7\_A)는 골조의 규모가 작고 변장비가 높은 경우(3F1S)에서 직접해석법의 결과가 크게 나타났으며, 이러한 편차는 초기변형 허용값 L/700을 적용한 경우에 증가하였다. 그러나 가상하중 적용이 단순누가방식이 아닌 경우 골조의 규모차이에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

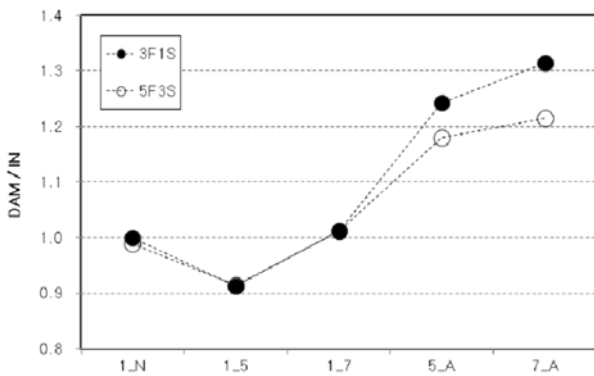


Fig. 4 Effect of frame size

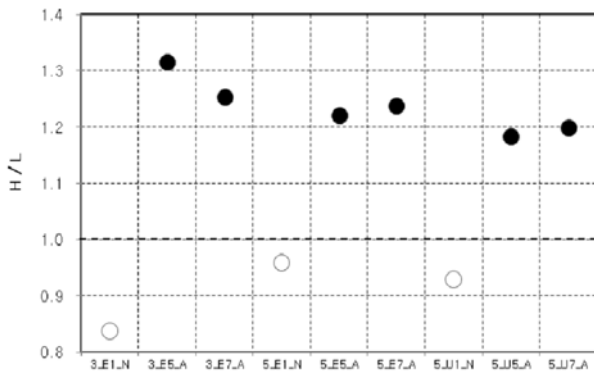


Fig. 5 Effect of axial load ratio

### 4.2.2 축력비

축력비 변화의 따른 영향을 평가하기 위해 1층 기둥재의 각 변수별 직접해석법과 2차 비탄성해석의 휨모멘트 비를 대상으로, 고축력(H)과 저축력(L)간의 비율을 Fig. 5에 나타내었다.

Table 4, 5와 Fig. 5의 결과에서 가상하중을 단순 누가하여 적용한 경우(\_A)에는 고축력시에 직접해석법이 2차 비탄성해석에 비해 소요강도를 더 크게 평가하고 있으며, 이러한 경향은 3층 골조의 경우 초기변형 허용값을 L/500으로 한 경우에서 더 크나, 5층 골조에서는 초기변형 허용값에 따른 차이는 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 하지만, 가상하중이 적용되지 않은 경우(\_N)에서는 고축력시에 직접해석법이 2차 비탄성해석에 비해 소요강도를 저축력시보다 더 낮게 평가하는 것으로 나타났으며 이러한 경향은 3층 골조에서 더 두드러지게 나타났다.

따라서 직접해석법의 적용 방법과 골조 규모에 따라서 축력비의 영향은 다르게 나타나는 것으로 판단되며, 구조설계의 입장에서 고축력의 조건하에서 B2 계수가 1.5 이하이고 수평하중이 존재하여 직접해석법 적용 방법으로 가상수평하중을 배제하는 경우를 선택한다면 소요강도를 과소평가할 우려가 있으므로 이에 대한 적절한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

### 4.2.3 축력 분포

평면상 축력분포에 따른 영향을 평가하기 위해 내,외 기둥재의 차이를 고찰 할 수 있는 5층 골조 1층 기둥재의 축력 분포별 직접해석법 적용 결과와 2차 비탄성해석 결과 휨모멘트의 비를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6의 결과에서 고축력(H)의 경우에는 평면상의 축력 분포 차이에 따른 영향이 거의 없는 것으로 나타났으나, 저축력(L)의 경우에는 외부에 축력이 큰 경우(U)에서 직접해석법과 2차 비탄성해석간의 차이가 다소 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 이러한 차이는 초기변형 허용값에 따른 가상하

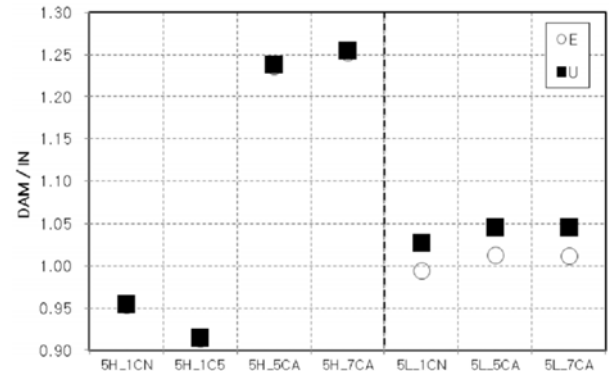


Fig. 6 Effect of axial load distribution

중 적용방식의 영향은 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

#### 4.2.4 가상하중 크기

가상하중의 크기 결정 방식에 따른 영향을 평가하기 위해 1층 기둥재의 각 변수별 직접해석법 적용 결과(DAM)와 2차 비탄성해석 결과(IN)의 휨모멘트 비를 Fig. 7에 나타내었다. 단, B2계수가 1.5 이하이고 수평하중이 존재하는 경우 가상하중을 생략할 수 있도록 한 경우(N)에는 적용되는 초기변형 허용값이 없으므로 2차 비탄성해석시 초기변형을 L/500으로 가정한 경우(/5)와 L/700으로 가정한 경우(/7)로 각각 나누어 결과를 표시하였다.

3.3에서 언급한 바와 같이 모든 경우에서 B2 값이 1.5 미만이고 수평하중이 존재하는 경우이므로 기준에 의해 초기변형의 영향을 생략할 수도 있는 대상이 된다.

Fig. 7의 결과에서 보면 축력비가 높을 경우(H) 기준에서 허용하고 있는 방법인 가상하중을 고려하지 않고 직접해석법을 적용한 결과(N)가 2차 비탄성해석 결과보다 낮은 소요강도를 나타내고 있다. 특히 초기변형 허용값 L/500을 적용한 경우에는 10% 내외로 소요강도를 과소평가하는 것으로 나타났다. 본 연구에 적용된 고축력의 상황이 다소 극단적인 경우라는 점을 고려하더라도 소요강도를 과소평가할 가능성이 있다는 점은 구조설계자 입장에서는 충분히 고려해야 할 사항이라 판단된다.

그에 반하여 기존의 수평하중에 가상하중을 단순 누가한 경우(\_5, \_7)에는 고축력의 경우 소요강도를 최대 46% 과대 평가하고 있다. 이러한 축력비에 따른 가상하중 적용 방식에 따른 편차는 3층 골조의 경우에서 더욱 크게 나타났다.

하지만 저축력(L)의 경우에는 적용 가상하중 크기에 따른 편차가 그리 크지 않은 것으로 나타났으며, 소요강도를 과소평가하는 경우도 최대 17%로 고축력에 비해 크지 않은 것으로 나타났다.

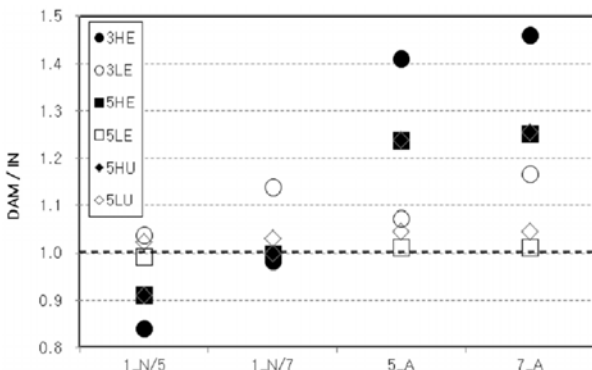


Fig. 7 Effect of notional load values

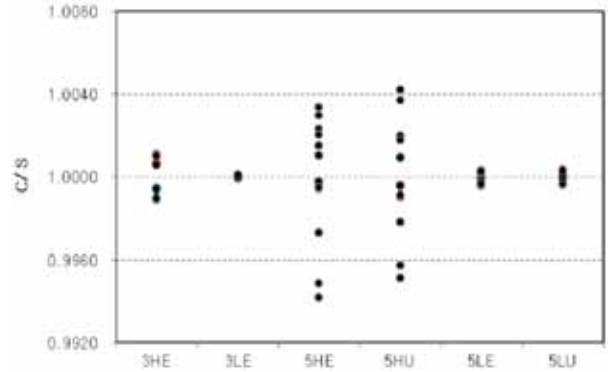


Fig. 8 Effect of notional load applied locations

#### 4.2.5 가상하중 적용 위치

가상하중의 적용 위치에 따른 영향을 평가하기 위해 각 변수별로 각각의 기둥재에 가상하중을 가력한 경우(C)와 층수평하중 형태로 가상하중을 가력한 경우(S)의 비를 Fig. 8에 나타내었다.

해석 결과에서 보면 2차원 대칭형 비가새 골조의 경우 가상하중의 가력 방식에 따른 차이는 무시할 수 있는 수준인 것으로 나타났다. 다만, 매우 미소하기는 하나 축력이 증가하면 다소간의 차이가 발생하며, 이러한 차이는 5층 3스팬 골조에서 다소 높게 나타났다.

따라서 실무에서 하중 모델링이 용이한 층수평하중 형태(S)의 가력방식을 사용하여도 소요강도 산정에 유의미한 차이가 없을 것으로 예상된다.

하지만 본 연구 결과는 2차원 대칭형 골조에 한정된 결과이므로 향후 3차원 비대칭 골조의 경우 가력 방식에 따른 차이에 대해서는 추가적인 연구를 통한 타당성 검증이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4.2.6 최소수평하중 개념 적용 여부

가상하중 산정시 최소수평하중 개념을 적용하였을 경우의 효과를 평가하기 위해 각 변수별 가상하중 미적용의 경우(N)와 최소수평하중 개념을 적용하여 실 수평하중보다 가상하중이 클 경우 가상하중을 기존의 수평하중 대신에 적용한 경우(\_5, \_7)에 대한 직접해석법과 2차 비탄성해석 결과의 비를 Fig. 9 및 Fig. 10에 나타내었다. 단, 본 연구에서 저축력의 경우에는 가상하중이 기존의 수평하중에 비해 작은 값을 나타내어 고축력(H)의 경우에만 가상하중이 최소수평하중 형태로 나타나게 된다.

해석결과를 살펴보면 3층 골조의 경우 최소수평하중 개념을 적용하게 되면 앞에서 지적된 실무 설계 적용시 가장 큰 문제점이 될 수 있는 직접해석법이 2차 비탄성해석결과에 비해 소요강도를 과소평가하는 문제를 보상해주는 유의미한 효

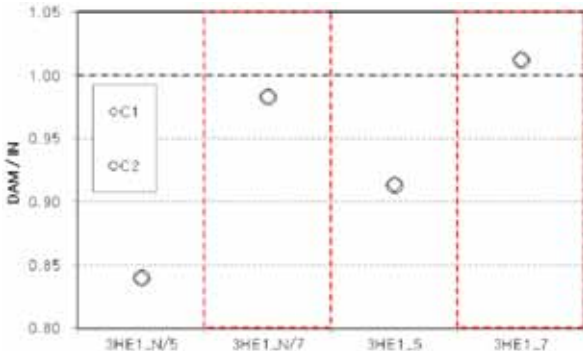


Fig. 9 Effect of minimum lateral load (3F1S)



Fig. 10 Effect of minimum lateral load (5F3S)

과가 있는 것으로 판단되며, 특히 초기변형 허용값을 L/700으로 가정한 경우(7)에서 직접해석법을 적용한 소요강도가 2차 비탄성해석 결과와 비교하여 과소평가 되지 않는 것으로 나타났다.

5층 골조의 경우 최소수평하중 개념을 도입하여도 그 영향이 그리 크지 않은 것으로 나타났으나, 5층 골조의 경우에도 초기변형 허용값으로 L/700을 적용했을 때 소요강도를 적절하게 평가하고 있는 것으로 나타났다.

설계실무 차원에서 안정설계시 중요한 요소는 실제 현실을 적절히 반영하여, 발생할 것으로 예상되는 소요강도를 효율적으로 평가하는 것이다. 이러한 측면에서 볼 때 소요강도를 과소평가할 우려가 큰 고축력 조건하의 골조에 경우, 2차 비탄성해석 결과와 가장 근접한 결과를 나타내는 것은 초기변형 허용값을 국내 시방서 내용을 반영한 L/700로 적용하고, B2계수의 결과가 1.5 이하이고 수평하중이 존재하는 경우라 하더라도 수평하중과 가상하중간에 최소수평하중 개념을 이용하여 층수평하중 형태로 가상하중을 적용한 경우라 판단되며, 본 방법이 해석의 용이성 측면이나 결과의 신뢰성 측면에서 모두 직접해석법의 실무 설계 적용에 적합할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서 파악된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 축력의 경우 초기변형 허용값의 차이에 따른 소요강도 변화가 없으나 휨모멘트의 경우 변수별로 유의미한 소요강도 의 변화가 나타났다. 따라서, 국내 건축공사표준시방서에서 제시한 초기변형 허용값인 L/700에 근거한 가상하중 산정이 필요하다.
- (2) 고축력비 조건하에서 직접해석법 적용을 위해 초기변형에 따른 가상수평하중을 배제하는 경우 소요강도를 과소평가할 우려가 있다.
- (3) 평면상 축력분포 차이에 따른 영향은 저축력(L)의 경우에 증가하며, 초기변형 허용값에 따른 가상하중 적용방식의 영향은 받지 않는다.
- (4) 2차원 대칭형 비가새 골조의 안정해석시 가상하중을 실무에서 모델링이 용이한 층수평하중 형태로 적용하여도 소요강도에는 변화가 없다. 다만, 3차원 비대칭 골조의 경우 추후 추가적인 연구를 통한 타당성 검증이 필요하다.
- (5) 실무에서 대칭형 비가새 골조의 신뢰할 수 있는 소요강도를 효율적으로 얻기 위한 직접해석법 적용 방법으로 국내 초기변형 허용값 L/700에 근거한 가상하중을 B2계수의 결과가 1.5 이하이고 수평하중이 존재하는 경우 에라도 수평하중과 가상하중 간에 최소수평하중 개념을 이용하여 층수평하중 형태로 가력하는 것을 제안한다.

## 감사의 글

이 논문은 2012학년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구 되었음.

## 참 고 문 헌(References)

- [1] 국토해양부(2009) 건축구조기준. 국토해양부, 대한민국. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2009) Korea Building Codes, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
- [2] 김희동(2010) 골조 안정성 평가를 위한 직접해석법 적용 방법에 따른 영향, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제 22권, 제4호, pp.293-303. Kim, H.D (2010) The influence of the application methods of direct analysis method for the evaluation of frame stability, *Journal of Korean Society of*



- Steel Construction*, KSSC, Vol. 22, No. 4, pp. 293-303 (in Korean).
- [3] 김희동(2010) 하중증폭계수를 적용한 비대칭 비가새 골조 2차 해석 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제1호, pp.87-97.  
Kim, H.D (2010) Evaluation of the Second Order Analysis of Asymmetric Unbraced Frame by using Load Amplification Factor, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 22, No. 1, pp.87-97 (in Korean).
- [4] 김희동, 이명재(2009) 하중증폭계수를 적용한 비가새 골조 2차 해석 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제6호, pp.627-636.  
Kim, H.D. and Lee, M.J. (2009) Evaluation of the Second Order Analysis of Unbraced Frame by using load amplification factor, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 21, No. 6, pp.627-636 (in Korean).
- [5] AISC (2010) *Specification for Structural Steel Buildings*, AISC, USA.
- [6] 건설교통부(2006) 건축공사표준시방서, 건설교통부, 대한민국.  
Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2006) *Korea Building Codes*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
- [7] Kim, H.D. and Lee, M.J. (2009) Experimental Investigation of the P- $\Delta$  Effect and Factor B2 of Low-rise Unbraced Steel Frames, *International Journal of Steel Structures*, Vol. 9. No. 2, KSSC, Korea.
- [8] McGuire, W., Gallagher, R.H., and Ziemian, R.D. (1999) *Matrix Structural Analysis*, With MASTAN2, Wiley, USA.

**요 약:** 국내 현실을 고려한 직접해석법 적용 방안의 제안을 위한 기초 연구로 국내의 강구조물 제작 및 설치시 적용되는 초기변형 허용값을 반영한 직접해석법 적용의 타당성을 해석적으로 평가하였다. 해석의 주요 변수로는 골조의 규모, 축력비, 축력분포, 가상하중 크기, 가상하중 가력 위치, 최소수평하중 개념 적용 여부 등을 적용하였다. 수치해석적 연구 결과 국내 초기변형 허용값인 L/700의 적용은 타당한 것으로 나타났으며, 이를 위한 방안으로 초기변형 허용값 L/700에 근거한 가상하중을 B2계수의 결과가 1.5 이하이고 수평하중이 존재하는 경우에도 수평하중과 가상하중간에 최소수평하중 개념을 이용하여 층수평하중 형태로 가력하는 방법을 제안하였다.

**핵심 용어:** 초기변형 허용값, 직접해석법, 대칭형 비가새골조, 가상하중, 최소수평하중